

Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Regelung des Bremsdruckes in den Radbremsen eines Bremsensystems, bei dem der Druck durch Ansteuerung von Proportionalventilen, wie Proportional-Sitzventilen, geregelt wird. Die Erfindung ist insbesondere für ein elektrohydraulisches Bremsensystem (EHB) geeignet.

[0002] In einer bekannten elektrohydraulischen Bremsanlage (EHB) werden zur quasikontinuierlichen Druckeinstellung proportionale Sitzventile, speziell stromlos geschlossenen Sitzventile (PSG-Ventile), verwendet. Jeder Radkreis bzw. jede Radbremse ist dabei mit je einem PSG-Ventil für den Druckauf- und -abbau versehen.

[0003] Zur Regelung des Drucks in der Radbremse eines solchen bekannten elektrohydraulischen Bremsensystems wird eine logische Struktur verwendet, die abhängig von der Abweichung zwischen dem angeforderten Radbremsdruck p_{soll} und dem aktuellen Radbremsdruck p_{ist} die Zustände "Aufbau", "Abbau" und "Halten" unterscheidet.

[0004] In den Zuständen "Aufbau" und "Abbau" wird die Stellgröße (Ventilstrom) durch einen Regelkreis mit Vorsteuerung bestimmt. Im Zustand "Halten" wird der Ventilstrom auf Null abgesenkt, so dass beide Ventile schließen.

[0005] Die Vorsteuerung besteht hierbei darin, den im aktuellen Betriebspunkt (charakterisiert durch die über dem zu regelnden Ventil anstehende Druckdifferenz) benötigten Öffnungsstrom I_0 (Ventilstrom, der gerade zum Abheben des Ventilstößels führt) vorzugeben.

[0006] Fertigungstoleranzen und Alterungseffekte (Verschleiß) der PSG-Ventile sowie veränderliche Umgebungsbedingungen (Temperatur, Sensor drift, stationäre Fehler einer unterlagerten Ventilstromregelung bzw. Bordnetzschwankungen bei pulsweitenmodulierter Ventilansteuerung ohne Stromregelung) führen dazu, dass der Zusammenhang zwischen dem Ventilöffnungsstrom und der Druckdifferenz über dem Ventil nicht bei allen Ventilen gleich und zudem langsam zeitvariant ist. Die Anwendung einer festen Vorsteuercharakteristik garantiert daher nicht die gleichbleibende Qualität der Raddruckregelung.

[0007] Ist der im Steuergerät berechnete Vorsteuerstrom zu niedrig (kleiner als der tatsächliche Öffnungsstrom) wird nicht die maximale Dynamik und bestmögliche Dosierbarkeit der Druckeinstellung erreicht, bei zu hoch berechnetem Vorsteuerstrom ist die Stabilität des Druckregelkreises gefährdet.

[0008] Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, die vorgenannten Probleme bekannter Bremsensysteme zu überwinden und ein Verfahren zur Regelung des Bremsdruckes in den Radbremsen eines derartigen Bremsensystems zu entwickeln, das von den Bauteiltoleranzen des Systems, insbesondere von den Toleranzen der Öffnungs-Strom-Charakteristik der Ventile, weitgehend unabhängig ist.

[0009] Es hat sich herausgestellt, dass diese Aufgabe durch das im Anspruch 1 beschriebene Verfahren gelöst werden kann, das darin besteht, dass bei einem Verfahren der eingangs genannten Art ein in einer geschlossenen Regelschleife gewonnener Bremsdruck-Istwert einem vorgegebenen Bremsdruck-Sollwert durch dynamische Modellreferenzregelung nachgeführt wird.

[0010] Die Erfindung basiert im Prinzip auf der Anwendung einer Modellreferenzregelung zur Schaffung einer robusten/adaptiven Raddruckregelung, insbesondere für elektrohydraulische Bremsanlagen (EHB).

[0011] In den Unteransprüchen sind vorteilhafte Ausführungsbeispiele und Einzelheiten der Erfindung beschrieben. Anspruch 2 bezieht sich speziell auf den Ausgleich von To-

leranzen der Öffnungs-Strom-Charakteristik der Proportionalventile, d. h. von Fertigungstoleranzen, durch Verschleiß oder durch Alterung bedingte Abweichungen der Öffnungs-Strom-Charakteristik der Ventile etc.

[0012] Nach einem weiteren Ausführungsbeispiel der Erfindung werden in der geschlossenen Regelschleife durch Vergleich des Bremsdruck-Sollwertes mit dem Bremsdruck-Istwert Ventil-Vorsteuersignale auf Basis eines Raddruckregelalgorithmus gewonnen, aus denen durch Addition oder Subtraktion von Korrekturwerten die Ventilansteuersignale abgeleitet werden. Speziell kann dann das mit Hilfe der dynamischen Modellreferenzregelung ein Bremsdruck-Referenzwert gebildet werden, dessen Abweichung von dem in der geschlossenen Schleife gebildeten Bremsdruck-Istwert unter Berücksichtigung von Zustandsinformationen über die Änderungstendenz des Bremsdruck-Sollwertes zur Ermittlung der Korrekturwerte herangezogen wird.

[0013] Die im folgenden noch näher erläuterten Regeln 1, 2 und Regeln 3, 4, die unter speziellen Bedingungen zur Anwendung kommen, sind in den Unteransprüchen 5 und 7 angegeben. Nach dem abhängigen Anspruch 6 wird das erfindungsgemäße Korrekturverfahren auf Situationen mit relativ geringer Dynamik begrenzt, weil bei hoher Dynamik die Toleranzen der Ventil-Strom-Öffnungs-Charakteristiken von untergeordneter Bedeutung sind.

[0014] Im folgenden wird das auf dem Prinzip der Modellreferenzregelung basierende Verfahren anhand der beigefügten Abbildung "Fig. 1" beschrieben, die in schematisch vereinfachter Darstellung einen Regelkreis zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens wiedergibt und das Funktionsprinzip des erfindungsgemäßen Systems veranschaulichen soll.

[0015] Nach Fig. 1 wird ein Bremsdruck-Sollwert p_{soll} in einer geschlossenen Regelschleife mit einem Bremsdruck-Istwert p_{ist} verglichen. Ein Funktionsblock 1 symbolisiert den hier angewendeten Raddruckregelalgorithmus eines VEHB-Systems, an dessen Ausgängen Ventil-Ansteuersignale $I_{0,IV}$, $I_{0,OV}$ für das Druckaufbau- oder Einlassventil IV (IV = inlet valve = Einlassventil, siehe I_{IV} , $I_{C,IV}$) und für das Druckabbau- oder Auslassventil OV (OV = outlet valve = Auslassventil, siehe I_{OV} , $I_{C,OV}$) zur Verfügung stehen; die Ventil-Ansteuersignale $I_{0,IV}$, $I_{0,OV}$ setzen sich aus Vorsteuersignalen und aus konventionellen Regelungssignalen (die z. B. nach PID-Regelalgorithmus wiedergeben) zusammen.

[0016] Ein dynamisches Referenzmodell bzw. eine dynamische Modellreferenzregelung wird durch einen Funktionsblock 3 symbolisch dargestellt. Am Ausgang steht ein Bremsdruck-Referenzwert p_{ref} zur Verfügung, der mit dem Bremsdruck-Istwert p_{ist} verglichen wird. Die Differenz zwischen p_{ref} und p_{ist} wird unter Berücksichtigung der von Zustandsinformationen, die vor allem über Druckabbau- oder Druckaufbautendenz Aufschluss geben, und des Bremsdruck-Sollwertes p_{soll} zur Ermittlung der Korrekturwerte $I_{C,IV}$ und $I_{C,OV}$ ausgewertet. Die Verarbeitung der Eingangsinformationen nach den Regeln 1–4 erfolgt in einem Funktionsblock 4. Die am Ausgang des Funktionsblocks anstehenden Korrekturwerte $I_{C,IV}$ und $I_{C,OV}$ werden zu der geschlossenen Regelschleife 1, 2 zurückgeführt und, wie beschrieben, den Ansteuersignalen $I_{0,IV}$, $I_{0,OV}$ im Addierer 5a, 5b hinzugefügt.

[0017] Bei der Bildung des dynamischen Referenzmodells (Funktionsblock 3) können zusätzlich weitere Einflussgrößen, wie Umgebungstemperatur etc., berücksichtigt werden. Auch dies ist in Fig. 1 angedeutet.

[0018] Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren werden aus

dem Verhalten des Raddruckregelkreises Abweichungen der Vorsteuerkennlinie von der realen Öffnungsstromcharakteristik der angesteuerten Ventile abgeleitet und korrigiert. Auf diese Weise wird die Robustheit der Regelung gegenüber den oben genannten Unsicherheiten verbessert. Darüber hinaus lassen sich die berechneten Korrekturwerte zur Adaption der Vorsteuerkennlinie heranziehen.

[0019] Gegenüber anderen bekannten Verfahren hat der hier behandelte Ansatz den Vorteil, dass eine Adaption während im realen Fahrbetrieb häufig auftretender Normalbremsmanöver vorgenommen werden kann.

Zum Prinzip der Modellreferenzregelung

[0020] Bei diesem Ansatz wird der Sollwert zusätzlich über ein dynamisches Referenzmodell geführt, dessen Ausgangsgröße das Zeitverhalten des geschlossenen Regelkreises unter der Annahme nominaler (d. h. beim Reglerentwurf angenommener) Streckenparameter widerspiegelt. Unterschiede zwischen der tatsächlichen Regelgröße (Istwert) und dem Referenzsignal weisen auf von den Nominalwerten abweichende Streckenparameter hin. Die Differenz von Referenzwert und Istwert wird zur Korrektur der Stellgröße oder der Reglerparameter (Adaptive Modellreferenzregelung) herangezogen.

[0021] Zur Anwendung dieses Konzepts auf die Raddruckregelung innerhalb eines elektrohydraulischen Bremssystems (1113) wurden folgende anwendungsspezifische Erweiterungen entwickelt:

Integralwirkende Korrektur zur Kompensation von Offset-Fehlern der Vorsteuerkennlinie

[0022] Während eines Regelvorgangs beobachtete Differenzen zwischen dem Referenz- und dem Istwert können – bei sonst ideal angenommenen Reglerparametern – als Abweichungen der gespeicherten Vorsteuerkennlinie von der tatsächlichen Öffnungsstromcharakteristik des zu regelnden Ventils interpretiert werden. Bei zu hoch (niedrig) liegender Vorsteuerung eilt der Raddruck dem Referenzdruckverlauf vor (nach).

[0023] Das hier beschriebene Verfahren ermittelt additiv wirkende Korrekturgrößen $I_{C,IV}$, $I_{C,OV}$, die jeweils, wie in Fig. 1 dargestellt ist, dem Ein- bzw. dem Auslassventil IV bzw. OV zugeordnet sind und basierend auf folgenden Regeln adaptiert werden:

Regel 1

[0024] Liegt ein ansteigendes Sollwertprofil vor und arbeitet der Druckregelalgorithmus im Druckaufbauzustand, so wird die dem Einlassventil IV zugeordnete Korrekturgröße $I_{C,IV}$ pro Zeiteinheit um einen Betrag $\delta_{IV,UP}$ erhöht, wenn gilt $p_{Ist} < p_{Ref} - \epsilon$, bzw. um einen Betrag $\delta_{IV,DN}$ abgesenkt, wenn gilt $p_{Ist} > p_{Ref} + \epsilon$. Der Wert ϵ kennzeichnet hierbei ein Unempfindlichkeitsband.

Regel 2

[0025] Liegt ein abfallendes Sollwertprofil vor und arbeitet der Druckregelalgorithmus im Druckabbauzustand, so wird die dem Auslassventil OV zugeordnete Korrekturgröße $I_{C,OV}$ pro Zeiteinheit um einen Betrag $\delta_{OV,UP}$ erhöht, wenn gilt $p_{Ist} > p_{Ref} + \epsilon$, bzw. um einen Betrag $\delta_{OV,DN}$ abgesenkt, wenn gilt $p_{Ist} < p_{Ref} - \epsilon$.

[0026] Die Änderung der Korrekturgrößen gemäß der angegebenen Regeln erfolgt jeweils ausgehend vom Momentanwert, d. h. es handelt sich um eine Korrekturwertintegra-

tion. Änderungen der tatsächlichen Öffnungsstromcharakteristik werden mit einer durch die Parameter $\delta_{IV,UP}$, $\delta_{IV,DN}$, $\delta_{OV,UP}$, $\delta_{OV,DN}$ beeinflussten Adaptionsgeschwindigkeit erfasst und in der Vorsteuerung kompensiert. Durch geeignete Wahl dieser Parameter lässt sich die Stabilität des erfindungsgemäßen Adaptionsverfahrens sicherstellen.

[0027] Ist die Variation der Öffnungsstromcharakteristik nicht durch eine im gesamten Arbeitsbereich konstante Offsetänderung beschreibbar, sondern treten allgemeine Änderungen des funktionalen Zusammenhangs $I_0(\Delta p)$ auf, so müssen die durch das Verfahren ermittelten Korrekturwerte dem jeweils zutreffenden Δp -Bereich zugeordnet werden.

Situationsabhängige Aktivierung/Deaktivierung der Korrekturwertintegration

[0028] Die Vorsteuerung, deren Abweichung von der realen Ventilcharakteristik durch die Modellreferenzregelung kompensiert werden soll, bestimmt das Zeitverhalten des Raddruckregelkreises hauptsächlich bei Solldruckprofilen mit niedrigen Gradienten, wie sie typischerweise bei Dosierbremsungen auftreten. Bei hochdynamischen Solldruckänderungen ist die durch das Referenzmodell vorgegebene Zeitverhalten hingegen u. U. nicht einzuhalten. Die Korrekturwertintegration wird daher beim Auftreten großer Sollwertgradienten ausgesetzt (alte Korrekturwerte werden eingefroren).

Schwingungserkennung und Schwingungsdämpfung

[0029] Da bei deutlich oberhalb des realen Ventilöffnungsstroms liegender Vorsteuerung häufige Zustandswechsel des Druckregelalgorithmus ausgelöst werden (Grenzstabilität), greift die in R1 und R2 formulierte Absenkung der Korrekturwerte nur begrenzt. Es ist daher sinnvoll, das Verfahren um die folgenden Regeln zu aktiven Schwingungsdämpfung zu erweitern:

Regel 3

[0030] Liegt ein ansteigendes Sollwertprofil vor und arbeitet der Druckregelalgorithmus im Druckabbauzustand, so wird die dem Einlassventil zugeordnete Korrekturgröße $I_{C,IV}$ pro Zeiteinheit um einen Betrag $\delta_{IV,OSC}$ abgesenkt.

Regel 4

[0031] Liegt ein abfallendes Sollwertprofil vor und arbeitet der Druckregelalgorithmus im Druckaufbauzustand, so wird die dem Auslassventil zugeordnete Korrekturgröße $I_{C,OV}$ pro Zeiteinheit um einen Betrag $\delta_{OV,OSC}$ abgesenkt.

Variation des Referenzmodells in Abhängigkeit messbarer Umgebungsbedingungen

[0032] Das dynamische Referenzmodell besteht aus einer Verzögerungskette (Totzeit T_t) und einem Tiefpassfilter (Zeitkonstante T_f). Diese Parameter können an die Umgebungsbedingungen, z. B. charakterisiert durch Temperatur und Bordnetzspannung, angepasst werden, sofern diese Signale dem Steuergerät (ECU) zugeführt werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Regelung des Bremsdruckes in den Radbremsen eines Bremssystems, bei dem der Druck durch Ansteuerung von Proportionalventilen, wie Proportional-Sitzventilen, geregelt wird, insbeson-

dere für ein elektrohydraulisches Bremsensystem (EHB), dadurch gekennzeichnet, dass ein in einer geschlossenen Regelschleife gewonnener Bremsdruck-Istwert (p_{ist}) einem vorgegebenen Bremsdruck-Sollwert (p_{soll}) durch dynamische Modellreferenzregelung (3) nachgeführt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass durch die dynamische Modellreferenzregelung (3) Toleranzen der Öffnungs-Strom-Charakteristik der Proportionalventile (IV, OV), d. h. Fertigungstoleranzen, durch Verschleiß, durch Alterung etc. hervorgerufenen Abweichungen der Öffnungs-Strom-Charakteristik der Ventile, erfasst und ausgeglichen werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass in der geschlossenen Regelschleife durch Vergleich des Bremsdruck-Sollwertes (p_{soll}) mit dem Bremsdruck-Istwert (p_{ist}) Ventil-Ansteuersignale ($I_{0,IV}$, $I_{0,OV}$) auf Basis eines Raddruckregelalgorithmus (1) gewonnen werden, aus denen durch Addition oder Subtraktion von Korrekturwerten ($I_{C,IV}$, $I_{C,OV}$) korrigierte Ventilansteuersignale (I_{IV} , I_{OV}) abgeleitet werden.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass mit Hilfe der dynamischen Modellreferenzregelung ein Bremsdruck-Referenzwert (p_{ref}) gebildet wird, dessen Abweichung von dem in der geschlossenen Schleife gebildeten Bremsdruck-Istwert (p_{ist}) unter Berücksichtigung von Zustandsinformationen und von Änderungstendenzen des Bremsdruck-Sollwertes (p_{soll}) zur Ermittlung der Korrekturwerte ($I_{C,IV}$, $I_{C,OV}$) herangezogen wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, für eine Bremsanlage mit radindividuellen Bremsdruckaufbau- und Bremsdruckabbauventilen, dadurch gekennzeichnet, dass für die Druckaufbauventile (IV) und Druckabbauventile (OV) individuelle Vorsteuersignale und Korrekturwerte ($I_{C,IV}$, $I_{C,OV}$) ermittelt werden, wobei (Regel R1) ein dem Druckaufbauventil (IV) zugeordneter Korrekturwert ($I_{C,IV}$) pro Zeiteinheit um einen bestimmten Betrag ($\Delta_{IV UP}$) erhöht wird, wenn bei ansteigendem Bremsdruck-Sollwertprofil im Druckaufbauzustand der Bremsdruck-Referenzwert (p_{ref}) größer ist als der um eine vorgegebene Größe (ϵ), die ein Unempfindlichkeitsband definiert, erhöhte Bremsdruck-Istwert (p_{ist}), und pro Zeiteinheit um einen bestimmten Betrag ($\Delta_{IV DN}$) erniedrigt wird, wenn bei ansteigendem Bremsdruck-Sollwertprofil im Druckaufbauzustand der Bremsdruck-Referenzwert (p_{ref}) kleiner ist als der um die vorgegebene Größe (ϵ) verringerte Bremsdruck-Istwert (p_{ist}), sowie dass (Regel R2) ein dem Druckabbauventil (OV) zugeordneter Korrekturwert ($I_{C,OV}$) pro Zeiteinheit um einen bestimmten Betrag ($\Delta_{OV UP}$) erhöht wird, wenn bei abfallendem Bremsdruck-Sollwertprofil im Druckabbauzustand der Bremsdruck-Referenzwert (p_{ref}) kleiner ist als der um die vorgegebene Größe (ϵ) reduzierte Bremsdruck-Istwert (p_{ist}), und pro Zeiteinheit um einen bestimmten Betrag ($\Delta_{OV DN}$) erniedrigt wird, wenn bei abfallendem Bremsdruck-Sollwertprofil im Druckabbauzustand der Bremsdruck-Referenzwert (p_{ref}) größer ist als der um die vorgegebene Größe (ϵ) erhöhte Bremsdruck-Istwert (p_{ist}).

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Korrektur durch die dynamische Modellreferenzregelung auf Situationen mit relativ niedrigem Gradienten des Soll-druckprofils beschränkt wird bzw. bei steilem Gradienten oder hochdynamischen Soll-

druckänderungen verhindert wird.

7. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 4 bis 6, für eine Bremsanlage mit radindividuellen Bremsdruckaufbau- und Bremsdruckabbauventilen, dadurch gekennzeichnet, dass für die Druckaufbauventile (IV) und Druckabbauventile (OV) individuelle Vorsteuersignale und Korrekturwerte ($I_{C,IV}$, $I_{C,OV}$) ermittelt werden sowie dass zur Schwingungserkennung und -dämpfung

(Regel R3) bei ansteigendem Bremsdruck-Sollwertprofil im Druckabbauzustand ein dem Druckaufbauventil (IV) zugeordneter Korrekturwert ($I_{C,IV}$) um einen bestimmten Betrag ($\delta_{IV OSC}$) pro Zeiteinheit abgesenkt und

(Regel R4) bei abfallendem Bremsdruck-Sollwertprofil im Druckaufbauzustand der dem Druckabbauventil (OV) zugeordnete Korrekturwert ($I_{C,OV}$) um einen bestimmten Betrag ($\Delta_{OV OSC}$) pro Zeiteinheit erniedrigt wird.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

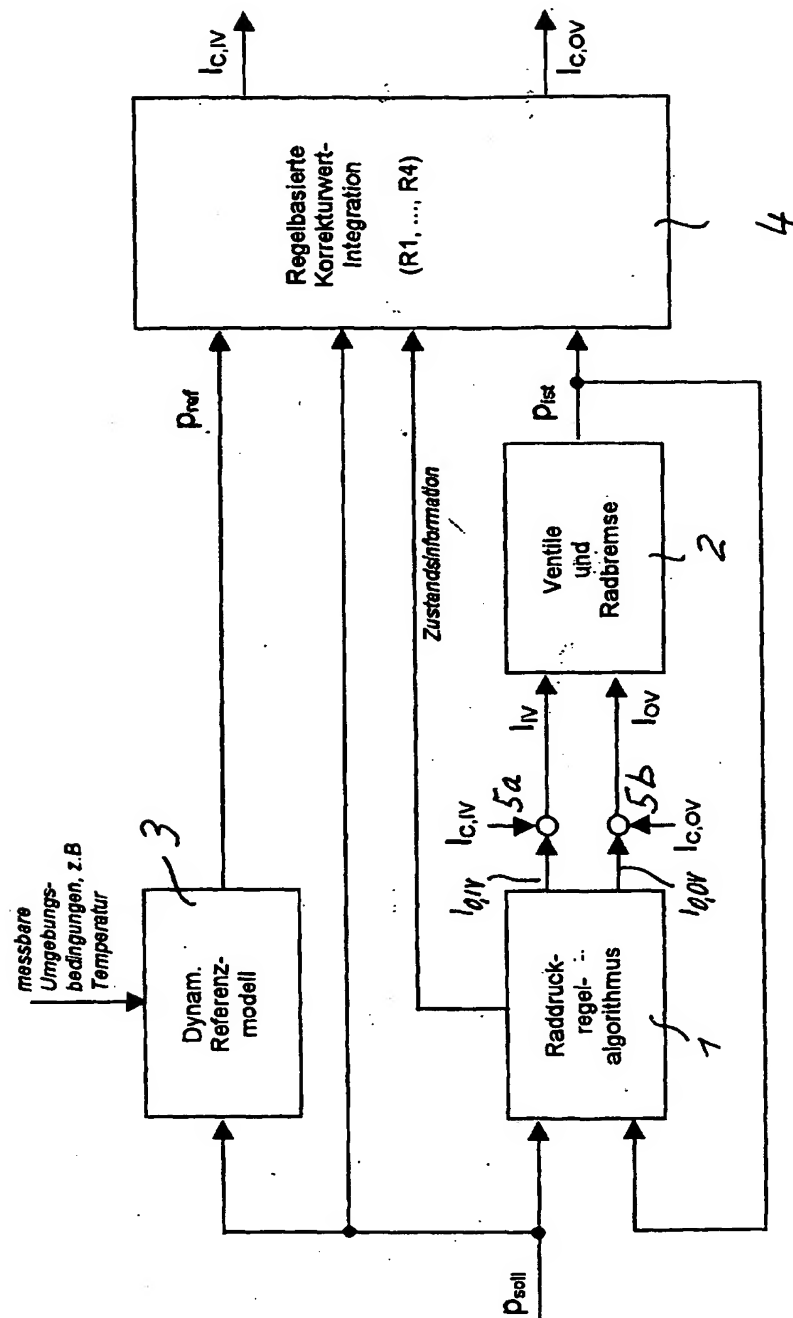


Fig. 1

- Leerseite -